



## Energy use of textile waste as an alternative fuel to a cement plant

Lilianna PIEC<sup>1</sup>, Małgorzata KAJDA-SZCZEŚNIAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, ul. Konarskiego 18, 44-101 Gliwice e-mail: [liliannapiec@gmail.com](mailto:liliannapiec@gmail.com)

<sup>2</sup> Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, ul. Konarskiego 18, 44-101 Gliwice, e-mail: [Malgorzata.Kajda-Szczesniak@polsl.pl](mailto:Malgorzata.Kajda-Szczesniak@polsl.pl)

### Abstract

This article presents the results of research into the basic fuel properties of polyamide textile waste in terms of its potential for energy use in the cement industry. The challenge of modern civilization constitutes reasonable waste management. Economic and industrial development is causing a sharp increase in the amount of waste worldwide. There are many ways in which this can be reduced, and thus bringing economic benefits. One way of using textile waste is to identify its energy potential. Cement plants use waste fuels as an independent fuel or as one of its components, depending on their individual requirements.

**Keywords:** textile waste, fuel from waste, energy use of waste

### Streszczenie

Energetyczne wykorzystanie odpadów tekstylnych jako paliwo alternatywne do cementowni

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań podstawowych właściwości paliwowych dla poliamidowego odpadu tekstylnego, pod kątem możliwości jego energetycznego wykorzystania w przemyśle cementowym. Wyzwaniem współczesnej cywilizacji jest przemyślana gospodarka odpadami. Rozwój gospodarczy oraz przemysłowy powoduje gwałtownie wzrastającą ilość odpadów na całym świecie. Istnieje wiele sposobów pozwalających na ich redukcję, czerpiąc tym samym korzyści gospodarcze. Jedną z możliwości wykorzystania odpadów tekstylnych jest określenie ich energetycznego potencjału. Cementownie wykorzystują paliwa z odpadów jako samodzielne paliwo bądź jako jeden z jego komponentów w zależności od ich indywidualnych wymagań.

**Słowa kluczowe:** odpady tekstylne, paliwo z odpadów, energetyczne wykorzystanie odpadów

### 1. Wstęp

Historia przemysłu tekstylnego rozpoczęła się przed wieloma laty, sięga 30 000 lat p.n.e. Wówczas powstawały pierwsze ubrania wykonane z futer, skór oraz trawy. Postępujący rozwój materiałów odzieżowych spowodowany był wytwarzaniem gotowych ubrań z wykorzystaniem maszyn parowych już na początku XVII w., jednak największa rewolucja produkcji odzieży ukształtowała się w XX wieku. W latach 50-tych XX w., nastąpił wzrost produkcji tkanin wytwarzanych z materiałów polimerowych. Aktualnie odgrywają one decydującą rolę w kształtowaniu się rodzajów grup tkanin, stosowanych do generowania odzieży powszedniego użytku [1,2].

W województwie śląskim w 2014 r. łączna masa odpadów komunalnych wynosiła 1 590 608 Mg, z czego 35 756 Mg stanowiły tekstylia. W średnim składzie morfologicznym tekstylia stanowią 2,39% wszystkich odpadów produkowanych na terenie województwa z uwzględnieniem odpadów wielkogabarytowych oraz odpadów pochodzących z terenów zielonych. Źródłami powstawania odpadów tekstylnych są zużyte ubrania oraz przedsiębiorstwa produkujące tkaniny bądź materiały tekstylne generujące duże ilości odpadów

poprodukcyjnych. Brak instalacji do przetwarzania tego typu odpadów oraz względy ekologiczne powodują duży problem z ich zagospodarowaniem. Do tej pory odpady te trafiały głównie na składowiska, gdzie były deponowane [3, 4].

W chwili pojawienia się nowej Ustawy z dnia 13 września 1996 r. o utrzymaniu czystości i porządku w gminach ewaluowało nastawienie mieszkańców do wykorzystania energetycznego odpadów. Zagospodarowanie palnych frakcji odpadów stwarza konieczność szeregu badań pod kątem termicznego przekształcania odpadów. Głównie analizowano wykorzystanie odpadów do produkcji paliwa alternatywnego oraz oceniano ich potencjał energetyczny [5].

W artykule przedstawiono analizę stanowiącą krótkie studium dotyczące podstawowych właściwości fizykochemicznych odpadów tekstylnych (100% poliamid) pod kątem możliwości ich energetycznego wykorzystania w przemyśle cementowym.

## 2. Walory energetyczne odpadów

Paliwo alternatywne (RDF) jest to odpad zaklasyfikowany pod kodem 19 12 10 jako „*Odpady palne (paliwo alternatywne)*” zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 roku w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2014 poz. 1923).

W 2003 r. zaakceptowano dokument pt. „*Refuse Derived Fuel, current practice and perspectives*”, zgodnie z którym określono definicję Refuse Derived Fuel (RDF), jako odpady specjalnie przekształcane, w celu poprawy kaloryczności paliw, głównie dla przemysłu cementowego [6].

Obecnie zwiększa się ilość paliw alternatywnych dla cementowni, posiadających odpowiednie warunki techniczne do ich zastosowania. Do produkcji paliw RDF wykorzystywane są odpady komunalne i przemysłowe [7]:

- odpadowe tworzywa sztuczne,
- zużyte opony, drewno,
- makulatura,
- zużyte oleje, rozpuszczalniki,
- zużyte gumy,
- wysuszony szlam z oczyszczalni ścieków,
- odpady komunalne,
- odpady tekstylne.

Odpady przemysłu wydobywczego i chemicznego [7]:

- chlorowane węgiel wodory,
- porafinacyjne smoły,
- zużyte ziemie wybielające olejów transformatorowych,
- parafiny wazelin technicznych,
- emulsje wodne węglowodorów pierwotnego pochodzenia albo po przeróbce,
- odpady węglowe - węglowe łupki oraz muły,
- zawiesiny olejowe zużytych smarów, wybielających ziem,
- wodne emulsje rafinacyjnych smół.

## 3. Charakterystyka badanego odpadu

Do badań wybrano materiał poliamidowy. Zaklasyfikowany on został pod kodem 04 02 09 jako „*Odpady materiałów złożonych (np. tkaniny impregnowane, elastomery, plastomery)*” zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 roku w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2014 poz. 1923).

Badany odpad poliamidowy zalicza się do grupy odpadów czystych. Został selektywnie wysegregowany jako użytek w postaci odzieży używanej oraz tekstyliów. Odpad poddano wstępnej analizie organoleptycznej, która wykazała, że występuje on w postaci stałej, charakteryzuje się bezwonnością, plastycznością oraz

elastycznością. Wygląd badanego materiału przed i po rozdrobnieniu przedstawiono odpowiednio na rys. 3.1 i 3.2.



Rys. 3.1. Pierwotna forma odpadu, źródło własne.



Rys. 3.2. Badany odpad w formie rozdrobnionej, źródło własne.

#### **4. Określenie właściwości paliwowych wybranego odpadu tekstylnego**

Celem badań było określenie podstawowych właściwości paliwowych dla odpadów tekstylnych pod kątem możliwości jego energetycznego wykorzystania w przemyśle cementowym. Badania właściwości paliwowych przeprowadzono zgodnie z wymogami norm, przedstawionymi w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Normy, wg których oznaczono właściwości paliwowe badanych odpadów tekstylnych.

Właściwości paliwowe	Norma
Oznaczenie gęstości nasypowej	PN-EN 1097-3:2000. Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości.
Oznaczenie wilgotności całkowitej metodą wagową	PN-EN 15414-3:2011. Stałe paliwa wtórne. Oznaczanie zawartości wilgoci metodą suszarkową. Część 3: Wilgoć w ogólnej próbce analitycznej.
Oznaczenie zawartości części palnych i niepalnych w odpadzie	PN-EN 15403:2011. Stałe paliwa wtórne. Oznaczanie zawartości popiołu.
Oznaczenie zawartości części lotnych	PN-G-04516:1998. Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości części lotnych metodą wagową.
Oznaczenie kaloryczności odpadu	PN-ISO 1928:2002 Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania metodą spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej.
Oznaczenie zawartości składników agresywnych	-
Oznaczenie zawartości węgla i wodoru	ISO 609:1996. Solid mineral fuels. Determination of carbon and hydrogen - High temperature combustion method.
Oznaczenie azotu ogólnego w badanym odpadzie	PN-G-04523:1992. Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości azotu metodą Kjeldahla.
Oznaczenie zawartości siarki metodą Eschki	PN-ISO 334:1997. Paliwa stałe. Oznaczanie siarki całkowitej - Metoda Eschki.
Oznaczenie zawartości chloru z zastosowaniem mieszaniny Eschki	PN-ISO 587:2000. Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości chloru z zastosowaniem mieszaniny Eschki.

## 5. Wyniki badań

### 5.1 Podstawowe parametry paliwowe

W tabeli 5.1 zaprezentowano wyniki oznaczeń właściwości fizykochemicznych badanego odpadu oraz porównano je z parametrami przykładowego paliwa energetycznego z odpadów komunalnych.

Parametrem wpływającym na transport i magazynowanie potencjalnych surowców jest ich gęstość nasypowa. Z definicji jest to stosunek masy luźno zasypanego badanego odpadu w postaci analitycznej do objętości naczynia, w którym dany materiał się znajduje. Zajmowana przestrzeń pomiędzy jego cząsteczkami w strukturze materiału zależy od jego stopnia rozdrobnienia, rodzaju oraz formy [8]. W analizowanym przypadku gęstość nasypowa materiału nie jest wysoka i wynosi ok. 48 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 5.1. Porównanie podstawowych parametrów energetycznych badanego odpadu tekstylnego oraz przykładowego RDF.

Parametr	Jednostka	Wartość	Przykładowe paliwo RDF [9]
Gęstość nasypowa	kg/m <sup>3</sup>	48,12	-
Wilgotność całkowita	%	2,56	0,88
Zawartość części palnych	%	99,93	87,87
Zawartość popiołu	%	0,07	12,13
Zawartość części lotnych	%	96,56	78,59
Ciepło spalania	MJ/kg	31,72	28,43
Wartość opałowa	MJ/kg	26,65	26,56

Zawartość wilgoci jest jednym z głównych parametrów określających właściwości paliwowe pod kątem wykorzystania odpadów w celach energetycznych. Wpływa negatywnie na przebieg procesu spalania ze względu na niwelację zapłonu w kotle oraz obniżanie ciepła spalania badanej próbki [8]. Badany odpad charakteryzuje się niską wilgotnością. Jest to wartość poniżej 3%. Im wyższa zawartość wilgoci, tym niższa wartość opałowa materiału wyjściowego.

Parametrem wpływającym na jakościowe właściwości paliwowe jest zawartość popiołu, ze względu na znajdujące się w jego strukturze metale ciężkie. Popiół należy do składników niekorzystnie wpływających na przebieg procesu spalania oraz wartość energetyczną paliwa. Natomiast niewielka ilość popiołu jest wskazana pod kątem zabezpieczenia rusztu przed jego nagrzewaniem się [8]. W przypadku badanego materiału poliamidowego zawartość popiołu kształtuje się na bardzo niskim poziomie, wynosi 0,07%.

Składnikiem decydującym o przebiegu procesu spalania są części lotne. Im większa zawartość części lotnych w paliwie tym łatwiejszy zapłon i szybsze spalanie (wymagają dodatkowych porcji powietrza w celu przebiegu pełnego procesu). Zbyt niska zawartość części lotnych prowadzi do utraty stabilności procesu spalania tzn. utrudnia zapłon [8]. W badanym odpadzie poliamidowym występuje duży udział części lotnych rzędu 97%.

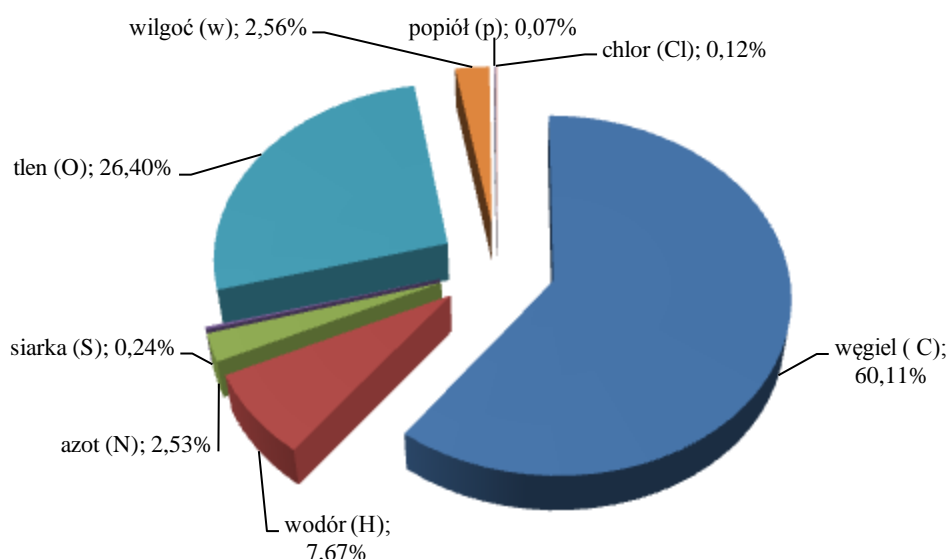
Wartość opałowa jest wyznaczana na podstawie laboratoryjnego oznaczenia ciepła spalania charakterystycznego dla skali uwęglenia substancji organicznej. Wartość opałowa kształtuje się na poziomie 26,65 MJ/kg, natomiast ciepło spalania wynosi 31,72 MJ/kg, spełniając pierwsze kryterium paliwa przeznaczonego dla przemysłu cementowego. Zarówno wartość opałowa jak i ciepło spalania stanowi parametr priorytetowy w charakterystyce jakościowej oceny materiału jako hipotecznej surowca energetycznego.

Dla porównania przedstawiono podstawowe właściwości fizyczne analizowanego odpadu tekstylnego oraz paliwa alternatywnego RDF z odpadów komunalnych.

Można zauważyć, że obydwie próbki paliw wykazują porównywalne parametry fizykochemiczne.

## 5.2 Skład pierwiastkowy badanego odpadu

Analiza składu elementarnego dotyczy zawartości procentowej pierwiastków tworzących dany materiał wyjściowy substancji palnej tzn. węgla C, wodoru H, azotu N, siarki S, chloru Cl oraz tlenu O. Udziały poszczególnych pierwiastków przedstawiono na rysunku poniżej (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Skład elementarny badanego odpadu poliamidowego, źródło własne.

Siarka jest składnikiem wpływającym negatywnie na przebieg procesu spalania, powodując przekształcenie siarki do spalin w postaci  $\text{SO}_2$ . Wysoka jej zawartość może powodować korozję paleniska [8]. Zawartość siarki

w badanym odpadzie poliamidowym wynosi poniżej 0,3% więc jest to wartość nieprzekraczająca dopuszczalnych wymagań przemysłu cementowego.

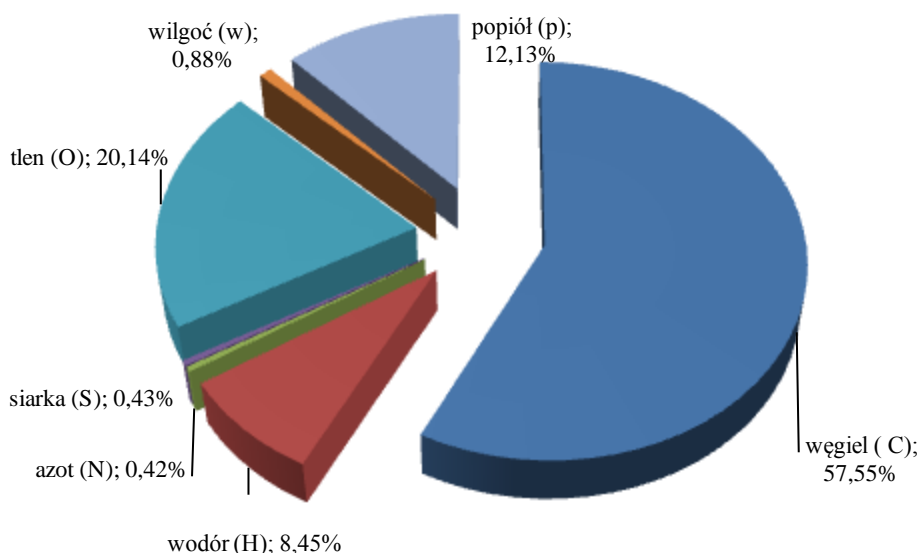
Kolejnym istotnym parametrem wpływającym na jakość paliwa alternatywnego w przemyśle cementowym jest zawartość chloru. Zawartość chloru w badanym odpadzie wynosi 0,12% frakcji palnej, spełniając tym samym kolejne kryterium w aspekcie energetycznego wykorzystania jako paliwa alternatywnego dla przemysłu cementowego.

Zawartość azotu ogólnego w badanym odpadzie poliamidowym określono na poziomie 2,5%, co wynika z budowy chemicznej cząsteczki poliamidu. Azot traktuje się jako balast podczas procesu spalania, gdzie jest on utleniany do szkodliwych tlenków azotu powodujących degradację środowiska naturalnego [8].

W badanym materiale wyjściowym największą zawartość pierwiastkową określono dla węgla, wynosi ona 60,11%. Wynika to z budowy chemicznej poliamidu, który zawiera w swojej strukturze powtarzające się grupy amidowe (-CH-NH-). Im większa zawartość węgla w danym materiale, tym wyższe ciepło spalania badanej próbki oraz obliczeniowa wartość opałowa [8].

Ostatnim parametrem wpływającym na jakość paliwa alternatywnego jest zawartość wodoru. W badanym odpadzie poliamidowym, wynosi ona 7,67%. Z punktu widzenia energetycznego wykorzystania - nawet niewielka jego ilość w badanym materiale może skutkować wysokim ciepłem spalania oraz decydować o łatwości zapłonu danego surowca [8].

Dla zestawienia uzyskanych wyników badań odpadu poliamidowego porównano je z ze składem elementarnym przykładowego paliwa alternatywnego RDF z odpadów komunalnych (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Skład elementarny przykładowego paliwa RDF z odpadów komunalnych [9].

W aspekcie energetycznego wykorzystania badanego odpadu poliamidowego oraz przykładowego paliwa RDF z odpadów komunalnych, przeprowadzona analiza nie wykazała istotnych różnic w ich składzie pierwiastkowym.

Zarówno wysoka zawartość węgla w przykładowym paliwie RDF (57,55%), jak i zawartość wodoru (8,45%) świadczyć może o tym, że zawiera ono w swoim składzie dużo tworzyw sztucznych, ze względu na porównywalnie małe różnice w stosunku do składu elementarnego poliamidowego materiału odpadowego.

### 5.3 Zawartość składników agresywnych

W tabeli 5.3 przedstawiono wyniki analizy otrzymanego wodnego roztworu, powstałego w wyniku całkowitego spalania próbki badanego odpadu w bombie kalorymetrycznej zawierającej wodę do absorpcji powstałych produktów spalania. W otrzymanym wodnym roztworze oznaczono zawartość składników w agresywnych jakimi są: tlenki siarki, azotu oraz chlorowodor.

Tabela 5.3. Wyniki analizy za wartości składników agresywnych w wodnym roztworze.

Parametr	Jednostka	Wartość
Zawartość SO <sub>2</sub>	mg/kg	poniżej progu oznaczalności
Zawartość HCl	mg/kg	19 251
Zawartość NO <sub>3</sub>	mg/dm <sup>3</sup> NO <sub>3</sub>	0,28

Zawartość azotu azotanowego w badanym materiale analitycznym generuje powstawanie np. tlenków azotu, które w wyniku procesu spalania są skutkiem ubocznym emitowanym do otoczenia. Zaliczane są one do jednych z najbardziej toksycznych składników gazów spalinowych. Ich oddziaływanie wpływa negatywnie na środowisko naturalne przyczyniając się do powstawania kwaśnych deszczów oraz smogu. Powstają w wyniku konwersji związków azotu zawartych w paliwie [10]. Zawartość azotu azotanowego w badanej próbce odpadów w wyciągu wodnym waha się w granicach 0,28 mg/dm<sup>3</sup>NO<sub>3</sub>.

Zawartość siarczanów w przeliczeniu na ditlenek siarki uzależniona jest od ilości siarki w spalonym paliwie oraz od warunków, w jakich prowadzony jest proces spalania. Zarówno tlenki azotu jak i siarki nie są pożądanymi jego produktami [10]. Należy je niwelować np. poprzez zastosowanie surowca o niskiej zawartości siarki. Maksymalna jej zawartość wynika z dopuszczalnych standardów emisyjnych SO<sub>2</sub> oraz ilości spalin, jaka powstaje po procesie. Ze względu na niewielką ilość siarki w badanym roztworze wodnym, zawartość SO<sub>2</sub> jest poniżej progu oznaczalności.

Zawartość chlorowodoru w badanym wodnym roztworze jest silnie uzależniona od ilości chloru. Jednym z najbardziej niebezpiecznych produktów spalania pod względem toksyczności jest min. HCl, będący głównym produktem spalania nieorganicznych i organicznych związków chloru [8]. Zawartość HCl w badanym wodnym roztworze wynosi mniej niż 20 tys. mg/kg.

## 6. Wnioski

Celem przeprowadzonej analizy było określenie właściwości paliwowych dla materiału poliamidowego pod kątem jego wykorzystania energetycznego w przemyśle cementowym. Przeprowadzone badania wykazały, że odpad posiada dobre właściwości paliwowe, spełnia wymagania stawiane przez cementownie dla współspalania z węglem w piecach cementowych. Produkcja paliw alternatywnych z odpadów jest dużym wyzwaniem ze względu na to, że cementownie stawiają coraz wyższe wymagania dotyczące m.in. wartości opałowej, zawartości popiołu, czy wilgoci. Ograniczenia stanowią również zawartości niektórych substancji, takich jak: chlor, siarka, oraz metale ciężkie – w szczególności rtęć. W związku z tym przedstawiono najbardziej aktualne wymagania cementowni dla paliw z odpadów w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Porównanie wymagań stawianych przez cementownie dla paliw alternatywnych z badanym odpadem poliamidowym.

Parametr	Jednostka	Wymagania stawiane przez cementownie (od 01.2017r.) [11]	Badany odpad – materiał poliamidowy
Wartość opałowa	MJ/kg <sub>mw</sub>	≥21	26,65
Zawartość popiołu	%	<20	0,07
Zawartość siarki	%	<0,5	0,24
Zawartość chloru	%	≤0,8	0,12
Wilgotność	%	≤20	2,56

Porównując otrzymane wyniki badań z wymaganiami przemysłu cementowego (tabela 6.1) można zauważyć, że:

- wysoka wartość opałowa świadczy o dobrej jakości wytwarzanego paliwa alternatywnego dla cementowni, pomimo coraz bardziej rygorystycznych wymagań odnośnie tego parametru;

- ze względu na śladowe ilości popiołu nie ma on wpływu na parametry energetyczne badanego odpadu poliamidowego. Badany odpad spełnia wymóg cementowni nie przekraczając 20% za wartości popiołu;
- zawartość siarki w próbce analitycznej nie przekracza wymaganej dla cementowni wartości 0,5%;
- niewielka ilość chloru w badanym materiale poliamidowym spełnia wymagania cementowni zawiera się w przedziale  $\leq 0,8\%$ ;
- badany materiał analityczny charakteryzował się niską zawartością wilgoci, spełniając ostatni wymóg cementowni. Jej zawartość nie przekracza 20%.

Podsumowując wyniki badań należy przyjąć, że badany odpad może stanowić samodzielne paliwo alternatywne lub być wykorzystany jako jeden z jego komponentów.

## Literatura

1. Materiały polimerowe stosowane w przemyśle odzieżowym. Część I. Tkaniny przeznaczone do produkcji odzieży codziennego użytku, <http://www.kompozyty.polsl.pl/article/12/43.pdf>, z dnia 22.04.18 r.
2. Pinheiro, E., Francisco, A. C., Management and Characterization of Textile Solid Waste in a Local Productive Arrangement, *Fibres&Textiles in Eastern Europe*, nr 4 (2016), str. 8-13.
3. Plan gospodarki odpadami dla województwa śląskiego na lata 2016-2022, <http://bip.slaskie.pl/dokumenty/2017/03/24/1490351326.pdf>, z dnia 22.04.18 r.
4. Odpady tekstylne i włókiennicze – wartościowy surowiec czy problematyczna pozostałość? <file:///C:/Users/Bogdan/Downloads/Odpady%20tekstylne%20i%20w%20C3%B3kiennicze.pdf>, z dnia 22.04.18 r.
5. Model technologiczno-logistyczny procesu energetycznego wykorzystania odpadów, <http://wydawnictwo.panova.pl/attachments/article/1/Monografia%20J.pdf>, z dnia 22.04.18 r.
6. Paliwo alternatywne na bazie sortowanych odpadów komunalnych dla przemysłu cementowego <http://www.polskicement.pl/files/Pages/84/uploaded/706.pdf>, z dnia 14.06.18 r.
7. Określenie potencjału odpadów i ich rodzajów do produkcji stałych paliw alternatywnych, [www.energia.dczl.wroc.pl/files/Określenie%20potencjału%20odpadów.pdf](http://www.energia.dczl.wroc.pl/files/Określenie%20potencjału%20odpadów.pdf), z dnia 23.04.18 r.
8. Czop M., Błaszczyk E., Badania podstawowych właściwości paliwowych odpadów poliolefinowych, *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, vol. 15 nr 3 (2013), str. 71-80.
9. Potencjał energetyczny i wykorzystanie odpadów komunalnych do produkcji paliw alternatywnych w Polsce, [https://www.researchgate.net/publication/314376243\\_Potencjal\\_energetyczny\\_i\\_wykorzystanie\\_odpadow\\_komunalnych\\_do\\_produkcji\\_paliw\\_alternatywnych\\_w\\_Polsce](https://www.researchgate.net/publication/314376243_Potencjal_energetyczny_i_wykorzystanie_odpadow_komunalnych_do_produkcji_paliw_alternatywnych_w_Polsce), z dnia 28.05.18 r.
10. Surowce energetyczne i ich przetwarzanie cz. II - paliwa stałe, Analiza elementarna paliw stałych [http://home.agh.edu.pl/~kepw/student/plik/ane\\_k.pdf](http://home.agh.edu.pl/~kepw/student/plik/ane_k.pdf), z dnia 23.04.18 r.
11. den Boer E., Hryb W., Kozłowska B. *Gospodarka Odpadami Komunalnymi Szanse Wyzwania i Zagrożenia*. Warszawa: Texte, 2017 r.